



CRC Press
Taylor & Francis Group



国防电子信息技术丛书

Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB
Third Edition

雷达系统分析与设计 (MATLAB版)(第三版)

【美】 Bassem R. Mahafza 著
周万幸 胡明春 吴鸣亚 孙俊 等译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

雷达系统分析与设计

(MATLAB版)(第三版)

Radar Systems Analysis and Design Using
MATLAB, Third Edition

[美] Bassem R. Mahafza 著

周万幸 胡明春 吴鸣亚 孙俊 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书作者为著名雷达技术专家。全书讨论了雷达基本概念和技术原理,具体描述了雷达横截面、极化、匹配滤波器和雷达模糊函数及雷达波传播的最新进展,并给出了 PRN 码、多径和折射、高距离分辨率、杂波和 MTI 处理的有关内容。新版增加了更多的习题,包含丰富的 MATLAB 程序代码,可用于雷达系统的分析和设计,具有很高的实际应用价值。无论是雷达系统入门者、研究生还是工程技术人员,都能从中获益。

本书适合从事雷达系统设计及相关专业的工程技术人员阅读参考,也适合高等学校电子工程系雷达专业及相关专业的本科生和研究生阅读。

Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Third Edition, Bassem R. Mahafza
978-1-4398-8495-9

Copyright©2013 by Taylor & Francis Group, LLC

Authorized translation from the English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC, All rights reserved. 本书英文版由 Taylor & Francis Group 出版集团旗下的 CRC 出版社出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

Publishing House of Electronics Industry is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体版专有出版权由 Taylor & Francis Group, LLC 授予电子工业出版社,并限在中国大陆出版发行。专有出版权受法律保护。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2014-5485

图书在版编目(CIP)数据

雷达系统分析与设计:MATLAB 版:第3版/(美)马哈夫扎(Mahafza, B. R.)著;周万幸等译.
北京:电子工业出版社,2016.10

(国防电子信息技术丛书)

书名原文:Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Third Edition

ISBN 978-7-121-26001-8

I. ①雷… II. ①马… ②周… III. ①Matlab 软件—应用—雷达—系统分析—高等学校—教材 IV. ①TN95-39
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 094371 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:冯小贝

印 刷:三河市良远印务有限公司

装 订:三河市良远印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:40 字数:1030 千字

版 次:2008 年 10 月第 1 版(原著第 2 版)

2016 年 10 月第 2 版(原著第 3 版)

印 次:2016 年 10 月第 1 次印刷

定 价:128.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:classic-series-info@phei.com.cn。

《雷达系统分析与设计 (MATLAB 版) (第三版)》编委会

周万幸 胡明春 吴鸣亚 孙俊

翻译委员会

主任 周万幸

副主任 吴鸣亚 王建明

委员 吴道庆 周志鹏 李明 邢文革 夏贤江 范义晨 吴迺
贾中璐 尹德成 李大圣 陈勇华 邓大松 蔡晓睿 韩长喜
林晶 汤晓英 倪迎红 向群 冯晓磊

校对委员会

主任 胡明春

副主任 金林 孙俊

委员 邵春生 谢勇光 倪国新 杨剑飞 彭为 袁刚 史国庆
李晖 傅有光 王秀春 陈玲 伍光新 方能航 张蕾
沙舟 张春雁 肖文书



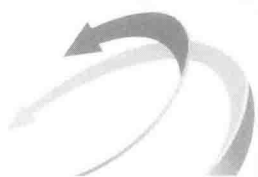
中国电子科技集团公司智能感知技术重点实验室

智能感知技术重点实验室是由中国电子科技集团公司于 2014 年 10 月批复设立的首批集团重点实验室之一，被列为中国电科集团示范实验室建设行列。

作为国内预警探测领域首个系统级创新研究型实验室，智能感知技术重点实验室的主要任务是面向未来复杂作战环境下武器装备发展信息化、体系化的新需求，建设一流研发平台，吸引国内外优势学术资源，从事智能感知体系、先进探测系统和基础技术研究，牵引专业技术发展，促进探测技术多学科融合，引领国家探测领域技术发展方向，提升国家探测领域自主创新能力，是技术创新体系重构的重要组成部分。

智能感知技术重点实验室始终坚持人才是科技创新的第一资源。目前，实验室已形成一支初具规模、结构合理、素质优良的人才队伍。其中，具有研究员与高级工程师职称的人员占比达 70%以上，具有硕博学位的人员占比达 85%以上。

“惟创新者进，惟创新者强，惟创新者胜”。智能感知技术重点实验室将瞄准国际前沿，面向国家重大需求，努力整合联合内外部优势力量，布局具有战略性、前瞻性、基础性科技创新资源，努力将实验室打造成聚集国内外一流人才的科技创新高地。



译者序

《雷达系统分析与设计（MATLAB 版）（第三版）》从系统分析与设计角度，对雷达信号处理领域的基础知识、前沿技术进行了全面、系统、深入的理论介绍与数学分析，并配备 MATLAB 辅助学习软件程序代码，已成为同类教材或专著标杆。

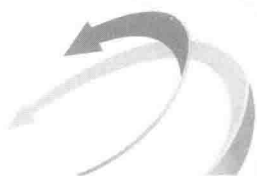
自第一版（2000 年）、第二版（2005 年）出版至今已 11 年，雷达信号处理领域涌现出众多的新理论、新技术。本书在前两版的内容脉络基础上，深入探讨了目标检测、目标跟踪、STAP 处理、SAR 信号处理等相关领域的最新进展，对相关领域的研究人员具有非常高的指导价值。

本书分为五个部分，共 18 章。第一部分为“雷达原理”，简要介绍雷达基础概念。第二部分为“雷达信号与信号处理”，关注雷达波形、雷达信号处理。第三部分为“雷达系统的特殊考虑”，阐述雷达波传播理论、雷达杂波及脉冲多普勒技术。第四部分为“雷达检测”，介绍单脉冲检测、目标起伏检测模型等。第五部分为“关于雷达的一些特殊主题”，重点阐述雷达 RCS、相控阵天线、自适应信号处理、目标跟踪、SAR 信号处理等。

本书由中国电子科技集团公司智能感知技术重点实验室组织翻译，周万幸、胡明春、吴鸣亚、王建明、孙俊、陈玲、邓大松、蔡晓睿、韩长喜、倪迎红等参与了翻译，并得到了中国电子科技集团公司第十四研究所各部门领导及专家的大量支持和帮助，在此一并感谢。由于水平和经验有限，翻译错误与不妥之处在所难免，敬请读者批评指正，以便今后进一步完善，不胜感激！

中国电子科技集团公司智能感知技术重点实验室主任

2016 年 7 月



前言^①

2000年, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB* 一书的第一版出版了。这本书是我根据雷达系统分析和设计研究生课程的多年教学经验撰写的, 内容涵盖了雷达信号处理中一些先进的论题。出书的主要目的是向学生们呈现一本适于阅读的综合性教材, 为他们提供 MATLAB 相关软件的亲身体验。这本书迅速成为了畅销书, 促使了 2005 年本书第二版的诞生。再版的新书在保持了原版的基本脉络的基础上, 对内容进行了更新、拓展及重新组织, 包含了本领域的最新进展, 在行文顺序上也更加合乎逻辑。文字部分增加了新的论题, 并对大量的 MATLAB 代码进行了更新和改进, 体现了 MATLAB 最新版本的先进性。

Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB 第一版的问世填补了市面上关于综合性、自成体系的雷达系统分析与设计教材的空缺。它是辅助 MATLAB 软件学习的首选书籍, 从书本的字里行间中给出了理论上和数学上的讨论。该书很快成为了此类专著的标准, 后续出版的此类主题的图书大多参照了本书。但是, 又没有哪一本书能够像本书的作者那样, 做出如此清晰和明了的阐述。特别是本书所提供的完整而全面的 MATLAB 代码, 使所有使用此书的人都可以不受任何限制就信手拈来。读者不仅可以再现本书中的任何一个图表, 而且还可以输入自己的参数改变代码, 生成特定的图表和输出, 以满足自身独特的学术需要。

除了从事大学的 MATLAB 授课之外, 我还参加了众多工业课程的教学活动, 举办过许多场雷达系统的专题讨论会。根据这些教学经验, 我明显地感到, 大家对于一本针对雷达系统设计和分析的方方面面的综合性教材或参考书的长期渴求。事实上, 许多大学教授也已经将这本书列为了雷达系统课程的主要教材。因此, 我编写此书的第三版的愿望就变成了现实, 并将更多的内容汇集在这本书中。

在我看来, 出版此书的第三版有如下原因: (1) 更加贴近如今相关领域的发展, 内容反映了当前完美的技术成就; (2) 在新版中增加了作者从使用本书进行教学的老师及从事工程实践的工程师处获取的很多反馈信息; (3) 介绍了若干其他专著较少涉及的新的论题; (4) 在每一章的结尾新增了一些问题供读者解答; (5) 对文字进行了重新组织, 更加方便不同层次的读者使用 (本书可作为三级研究生课程或者是本科高年级课程加两级研究生课程的教材); (6) 充分利用了最新的 MATLAB 版本所提供的新特点。

本书提供的 MATLAB 程序只是作为独立的学术工具设计的而没有其他用途。这里代码的

^① 本书中文翻译版的一些字体、正斜体、图示、符号保留了英文原版的写作风格, 特此说明。

编写方式是为了帮助读者更好地理解相关的理论。这些程序不是为任何类型的开环或闭环仿真研发的。本书中的 MATLAB 程序可通过 CRC 出版社的网站下载，登录 www.crcpress.com 搜索关键字“Mahafza”以定位本书的网页。

读者仍然可以像前两个版本一样，对第三版中出现的所有方程和公式，很方便地按照本书提供的步骤进行数学推导。因此，无论是相关的大学入门级教程还是高级教程，本书适合各个层次的读者阅读。第三版还综合了最新的雷达系统设计和分析问题。读者可以从中学到雷达设计、分析及信号处理的必备知识，可谓拥有一本书，胜过手头几本书。此外，新版还包含了大量的图表和插图，所提供的 MATLAB 代码将帮助读者对不同的雷达参数之间做出的折中进行评定。

本书共有 18 章，分为五个部分，分别是：第一部分，雷达原理；第二部分，雷达信号与信号处理；第三部分，雷达系统的特殊考虑；第四部分，雷达检测；第五部分，关于雷达的一些特殊主题。其中，第一部分由第 1 章和第 2 章组成。第 1 章“定义和术语”，给出了基本的雷达定义及本书通篇将会用到的大多数术语名称。第 2 章“基本脉冲和连续波 (CW) 雷达操作”，推导了脉冲雷达和连续波雷达的雷达方程，并对其他相关内容（如雷达损耗和噪声等）进行了详细的讨论。书中的雷达方程及双基地雷达方程均是在考虑电子对抗措施 (ECM) 存在的情况下进行推导的。

本书的第二部分包括第 3 章~第 7 章。本部分主要关注雷达信号（或波形）及雷达信号处理。其中，第 3 章“线性系统与复信号表示法”，包括对信号理论的各个要素的顶层讨论，这些理论是与雷达设计和雷达信号处理密切相关的。读者需要掌握足够的有关信号和系统及傅里叶变换和其相关特性的背景知识。在有关雷达应用的上下文中对低通和带通信号进行了讨论。还分析了连续系统和离散系统，并给出了采样定理。

第 4 章“匹配滤波器雷达接收机”，围绕匹配滤波器，介绍了它的特性，导出了匹配滤波器输出的一个普遍公式，适用于任意波形。第 5 章“模糊函数——模拟波形”和第 6 章“模糊函数——离散编码波形”，从模糊函数的角度对匹配滤波器的输出进行了分析，包括单一的未调制波、线性调频 (LFM) 脉冲、未调制脉冲串、LFM 脉冲串、步进频波形及非线性调频波形。第 6 章重点关注了离散的编码波形，分析了未调制脉冲串编码及二进制码、多相位码和频码。第 7 章“脉冲压缩”，具体讲述了使用脉冲压缩进行雷达信号处理的细节问题，给出了相关处理机和展宽处理机，并分析了使用步进频的高距离分辨率处理。

本书的第三部分共由 3 章组成。第 8 章“雷达波的传播”，将前面章节中所讲述的自由空间分析延伸到了包含大气效应在内的雷达性能，非常细致地讨论了折射、衍射、大气衰减、表面反射及多路径效应等论题。第 9 章的主题是雷达杂波，在这一章定义了区域性杂波和空间域杂波，重新推导了反映杂波存在的雷达方程，指出在此情形下，雷达的信干比要比信噪比显得更为关键。此外，还给出了杂波 RCS 的数学推导步骤及杂波后向散射系数的统计模型。第 10 章“动目标显示 (MTI) 和脉冲多普勒雷达”，讨论了如何使用延迟线对消器来缓解雷达信号处理机内杂波的影响。在有关盲速、解决距离和多普勒模糊的内容中分析了脉冲重复频率的参差。在本章的最后，简要分析了脉冲多普勒雷达。

本书的第四部分讨论并分析了雷达检测。要求学习这一部分的读者掌握较强的有关随机变量和随机过程的背景知识。因此，第 11 章“随机变量和随机过程”在对该主题进行回

顾后，行文中仅仅突出了一些主要问题。建议读者在阅读时把本章作为对随机变量和随机过程的一个顶层快速回顾资料。教师则可把本章作为学生的指定阅读材料。第 12 章“单脉冲检测”，描述了对已知和未知的信号参数的单脉冲检测。第 13 章“波动目标检测”，将第 12 章中的分析延伸到包含目标起伏的检测上来，讨论了 Swerling 目标模型。平方律检波器一节还对相干积累和非相干积累进行了详细的讨论。此外，本章还给出 CFAR 的概述，讨论了检测的累积概率及 MN 检测。

本书的第五部分讲述了雷达系统的一些专业论题。在第 14 章“雷达截面积 (RCS)”中，讨论了 RCS 与方向角、频率和极化的依赖关系，提出了一个目标散射矩阵，给出了许多简单目标的 RCS 公式。此外，还讨论了复杂目标的 RCS，介绍了推算 RCS 的若干方法。在第 15 章“相控阵天线”的开头给出了阵列的一般公式，讨论了线性阵列及包括矩形、圆形、带有圆形边界的矩形和同心圆阵列等几种情形在内的平面阵列的构型，分析了使用和没有有限位数两种情况下的波束控制，同时还给出了扫描损耗，并针对作者自己提出的多输入多输出雷达系统的概念进行了讨论和分析。在第 16 章“自适应信号处理”中，探讨了传统波束形成及自适应波束形成背后的概念，分析了采用最小均方算法的自适应信号处理，给出了自适应线性阵列和最小均方算法中的复杂加权计算。在本章的最后，对空时自适应处理进行了讨论。

在第 17 章“目标跟踪”中讨论了目标跟踪雷达系统。本章的第一部分讲述了单目标跟踪，详细讨论了顺序波束定向、圆锥扫描、单脉冲及距离跟踪。第二部分介绍了多目标跟踪技术，详细讲述了 $\alpha\beta$ 、 $\alpha\beta\gamma$ 等固定增益滤波器，引入了卡尔曼滤波器的概念；深入分析了卡尔曼滤波器的特殊情形，开发了基于 MATLAB 的卡尔曼滤波器仿真程序。第 18 章“战术合成孔径雷达 (TSAR)”是本书的最后一章，本章的论题包括：SAR 信号处理、SAR 设计上的几点考虑及 SAR 雷达方程，并讨论了按照顺序模式进行工作的阵列。

必须再次强调，虽然本书的部分内容可以用做雷达系统的高级教程，但是撰写本书的初衷主要还是提供一本研究生水平的教材。根据作者自身的教学经验，选用本书作为教材使用时可以进行如下划分：

1. 选择一：第 1 章~第 4 章（忽略一些难点部分）可以作为雷达系统的高级教程；第 5 章~第 10 章加上前面章节中跨过的一些难点部分可作为研究生初级阶段的教程；第 11 章~第 18 章可作为研究生中级阶段的高级教程。
2. 选择二：第 1 章~第 4 章可作为研究生阶段的入门级教程；第 5 章~第 10 章可作为研究生阶段的进阶教程；第 11 章~第 18 章可作为研究生阶段的精通级教程。

Bassem R. Mahafza
Huntsville, Alabama
United States of America

第一部分 雷达原理

| | |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 定义和术语 | 2 |
| 1.1 雷达系统的分类和波段 | 2 |
| 1.2 脉冲和连续波 (CW) 雷达 | 6 |
| 1.3 距离 | 7 |
| 1.4 距离分辨率 | 9 |
| 1.5 多普勒频率 | 11 |
| 1.6 相干性 | 17 |
| 1.7 分贝的算法 | 18 |
| 习题 | 19 |
| 附录 1-A 第 1 章 MATLAB 程序清单 | 20 |
| 第 2 章 基本脉冲和连续波 (CW) 雷达操作 | 22 |
| 2.1 雷达距离方程 | 22 |
| 2.2 低 PRF 雷达方程 | 26 |
| 2.3 高 PRF 雷达方程 | 28 |
| 2.4 监视雷达方程 | 30 |
| 2.5 带干扰的雷达方程 | 34 |
| 2.5.1 自屏蔽干扰器 (SSJ) | 35 |
| 2.5.2 烧穿距离 | 38 |
| 2.5.3 远距离干扰器 (SOJ) | 40 |
| 2.6 距离缩减因子 | 42 |
| 2.7 双基地雷达方程 | 42 |
| 2.8 雷达损耗 | 44 |
| 2.8.1 发射和接收损耗 | 44 |
| 2.8.2 天线方向图损耗和扫描损耗 | 44 |
| 2.8.3 大气损耗 | 45 |
| 2.8.4 折叠损耗 | 45 |
| 2.8.5 处理损耗 | 46 |

| | | |
|--------|--------------------------|----|
| 2.9 | 噪声系数 | 48 |
| 2.10 | 连续波雷达 | 51 |
| 2.10.1 | 连续波雷达方程 | 52 |
| 2.10.2 | 频率调制 | 53 |
| 2.10.3 | 线性调频 (LFM) 连续波雷达 | 57 |
| 2.10.4 | 多频连续波雷达 | 59 |
| 2.11 | MATLAB 函数 “range_calc.m” | 60 |
| | 习题 | 61 |
| | 附录 2-A 第 2 章 MATLAB 程序清单 | 65 |

第二部分 雷达信号与信号处理

| | | |
|-------|---------------|-----|
| 第 3 章 | 线性系统与复信号表示法 | 78 |
| 3.1 | 信号分类 | 78 |
| 3.2 | 傅里叶变换 | 79 |
| 3.3 | 系统分类 | 79 |
| 3.3.1 | 线性与非线性系统 | 80 |
| 3.3.2 | 时不变与时变系统 | 80 |
| 3.3.3 | 稳定与非稳定系统 | 80 |
| 3.3.4 | 因果与非因果系统 | 81 |
| 3.4 | 用傅里叶级数的信号表示法 | 81 |
| 3.5 | 卷积与相关积分 | 83 |
| 3.5.1 | 能量与功率谱密度 | 84 |
| 3.6 | 带通信号 | 87 |
| 3.6.1 | 解析信号 (前置包络) | 87 |
| 3.6.2 | 带通信号的前置包络与复包络 | 88 |
| 3.7 | 一些常规雷达信号的频谱 | 90 |
| 3.7.1 | 连续波信号 | 90 |
| 3.7.2 | 有限持续时间脉冲信号 | 91 |
| 3.7.3 | 周期脉冲信号 | 92 |
| 3.7.4 | 有限持续时间脉冲串信号 | 93 |
| 3.7.5 | 线性调频 (LFM) 信号 | 94 |
| 3.8 | 信号带宽与持续时间 | 98 |
| 3.8.1 | 有效带宽与持续时间计算 | 99 |
| 3.9 | 离散时间系统与信号 | 102 |
| 3.9.1 | 采样定理 | 102 |
| 3.9.2 | Z 变换 | 105 |
| 3.9.3 | 离散傅里叶变换 | 106 |
| 3.9.4 | 离散功率谱 | 106 |

| | | |
|--------------|-------------------|------------|
| 3.9.5 | 加窗技术 | 108 |
| 3.9.6 | 抽取与插值 | 111 |
| | 习题 | 112 |
| 附录 3-A | 第 3 章 MATLAB 程序清单 | 114 |
| 附录 3-B | 傅里叶变换对 | 118 |
| 附录 3-C | Z 变换对 | 119 |
| 第 4 章 | 匹配滤波器雷达接收机 | 120 |
| 4.1 | 匹配滤波器信噪比 | 120 |
| 4.1.1 | 白噪声情况 | 122 |
| 4.1.2 | 副本 | 123 |
| 4.2 | 匹配滤波器输出通式 | 124 |
| 4.2.1 | 静止目标情况 | 124 |
| 4.2.2 | 运动目标情况 | 125 |
| 4.3 | 波形分辨率和模糊 | 127 |
| 4.3.1 | 距离分辨率 | 127 |
| 4.3.2 | 多普勒分辨率 | 129 |
| 4.3.3 | 复合距离与多普勒分辨率 | 130 |
| 4.4 | 距离与多普勒不定 | 131 |
| 4.4.1 | 距离不定 | 131 |
| 4.4.2 | 多普勒不定 | 133 |
| 4.4.3 | 距离-多普勒耦合 | 134 |
| 4.4.4 | LFM 信号的距离-多普勒耦合 | 137 |
| 4.5 | 目标参数估计 | 138 |
| 4.5.1 | 何为估计函数 | 138 |
| 4.5.2 | 幅度估计 | 139 |
| 4.5.3 | 相位估计 | 139 |
| | 习题 | 140 |
| 第 5 章 | 模糊函数——模拟波形 | 142 |
| 5.1 | 引言 | 142 |
| 5.2 | 模糊函数的例子 | 143 |
| 5.2.1 | 单个脉冲模糊函数 | 143 |
| 5.2.2 | LFM 模糊函数 | 145 |
| 5.2.3 | 相干脉冲串模糊函数 | 149 |
| 5.2.4 | LFM 脉冲串的模糊函数 | 152 |
| 5.3 | 步进频率波形 | 155 |
| 5.4 | 非线性调频 | 157 |
| 5.4.1 | 静态相位的概念 | 157 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 5.4.2 频率调制波形的频谱赋形 | 161 |
| 5.5 模糊图等值线 | 162 |
| 5.6 LFM 信号的距离-多普勒耦合的解释 | 163 |
| 习题 | 164 |
| 附录 5-A 第 5 章 MATLAB 程序清单 | 165 |
| 第 6 章 模糊函数——离散编码波形 | 171 |
| 6.1 离散编码信号表示 | 171 |
| 6.2 脉冲串编码 | 172 |
| 6.3 相位编码 | 176 |
| 6.3.1 二进制相位编码 | 176 |
| 6.3.2 多相编码 | 189 |
| 6.4 频率编码 | 191 |
| 6.4.1 Costas 码 | 191 |
| 6.5 离散编码的模糊图 | 193 |
| 习题 | 194 |
| 附录 6-A 第 6 章 MATLAB 程序清单 | 194 |
| 第 7 章 脉冲压缩 | 199 |
| 7.1 时间-带宽积 | 199 |
| 7.2 脉冲压缩的雷达方程 | 200 |
| 7.3 脉冲压缩的基本原理 | 200 |
| 7.4 相关处理器 | 202 |
| 7.5 扩展处理器 | 207 |
| 7.5.1 LFM 脉冲信号 | 208 |
| 7.5.2 步进频率波形 | 213 |
| 7.5.3 目标速度的影响 | 219 |
| 习题 | 220 |
| 附录 7-A 第 7 章 MATLAB 程序清单 | 221 |

第三部分 雷达系统的特殊考虑

| | |
|---------------------------|------------|
| 第 8 章 雷达波的传播 | 228 |
| 8.1 地球对雷达方程的影响 | 228 |
| 8.2 地球大气层 | 228 |
| 8.3 大气模型 | 230 |
| 8.3.1 对流层中的折射率 | 230 |
| 8.3.2 电离层中的折射率 | 232 |
| 8.3.3 计算折射率的数学模型 | 233 |

| | | |
|------------------------------------|--------------------------|------------|
| 8.3.4 | 分层大气折射模型 | 234 |
| 8.4 | 三分之四地球模型 | 238 |
| 8.4.1 | 目标高度方程 | 238 |
| 8.5 | 地面反射 | 239 |
| 8.5.1 | 平滑表面反射系数 | 239 |
| 8.5.2 | 发散 | 243 |
| 8.5.3 | 粗糙表面反射 | 244 |
| 8.5.4 | 总反射系数 | 245 |
| 8.6 | 方向图传播因子 | 246 |
| 8.6.1 | 平坦地表 | 248 |
| 8.6.2 | 球形地球 | 249 |
| 8.7 | 衍射 | 253 |
| 8.8 | 大气衰减 | 256 |
| 8.8.1 | 大气吸收 | 257 |
| 8.8.2 | 大气衰减图 | 259 |
| 8.9 | 降水导致的衰减 | 262 |
| | 习题 | 264 |
| | 附录 8-A 第 8 章 MATLAB 程序清单 | 265 |
| 第 9 章 雷达杂波 | | 280 |
| 9.1 | 杂波的定义 | 280 |
| 9.2 | 表面杂波 | 280 |
| 9.2.1 | 区域杂波的雷达方程——机载雷达 | 282 |
| 9.3 | 体杂波 | 283 |
| 9.3.1 | 体杂波的雷达方程 | 285 |
| 9.4 | 表面杂波 RCS | 286 |
| 9.4.1 | 单脉冲低 PRF 情况 | 286 |
| 9.4.2 | 高 PRF 的情况 | 291 |
| 9.5 | 杂波元素 | 293 |
| 9.6 | 杂波后向散射系数统计模型 | 294 |
| 9.6.1 | 表面杂波的情况 | 294 |
| 9.6.2 | 体杂波情况 | 296 |
| | 习题 | 297 |
| | 附录 9-A 第 9 章 MATLAB 程序清单 | 297 |
| 第 10 章 动目标显示 (MTI) 和脉冲多普勒雷达 | | 302 |
| 10.1 | 杂波功率谱密度 | 302 |
| 10.2 | 动目标显示 (MTI) 的概念 | 302 |
| 10.2.1 | 单延迟线对消器 | 304 |

| | | |
|--------|----------------------------|-----|
| 10.2.2 | 双延迟线对消器 | 305 |
| 10.2.3 | 带有反馈回路(递归滤波器)的延迟线 | 307 |
| 10.3 | PRF 参差 | 308 |
| 10.4 | MTI 改善因子 | 311 |
| 10.4.1 | 2 脉冲 MTI 形式 | 312 |
| 10.4.2 | 通用形式 | 313 |
| 10.5 | 杂波下的可见度(SCV) | 314 |
| 10.6 | 有最佳权重的延迟线对消器 | 314 |
| 10.7 | 脉冲多普勒雷达 | 316 |
| 10.7.1 | 脉冲多普勒雷达信号处理 | 319 |
| 10.7.2 | 解距离模糊 | 320 |
| 10.7.3 | 解多普勒模糊包络 | 322 |
| 10.8 | 相位噪声 | 325 |
| | 习题 | 329 |
| | 附录 10-A 第 10 章 MATLAB 程序清单 | 331 |

第四部分 雷达检测

| | | |
|--------|----------------------------|-----|
| 第 11 章 | 随机变量和随机过程 | 337 |
| 11.1 | 随机变量 | 337 |
| 11.2 | 多元高斯随机向量 | 339 |
| 11.2.1 | 复数多元高斯随机向量 | 342 |
| 11.3 | 瑞利随机变量 | 342 |
| 11.4 | 卡方随机变量 | 343 |
| 11.4.1 | 自由度为 N 的中心卡方随机变量 | 343 |
| 11.4.2 | 自由度为 N 的非中心卡方随机变量 | 344 |
| 11.5 | 随机过程 | 345 |
| 11.6 | 高斯随机过程 | 346 |
| 11.6.1 | 低通高斯随机变量 | 346 |
| 11.6.2 | 带通高斯随机过程 | 347 |
| 11.6.3 | 带通高斯过程的包络 | 348 |
| | 习题 | 349 |
| 第 12 章 | 单脉冲检测 | 351 |
| 12.1 | 参数已知的单脉冲 | 351 |
| 12.2 | 幅度已知、相位未知的单脉冲 | 354 |
| 12.2.1 | 虚警概率 | 357 |
| 12.2.2 | 检测概率 | 358 |
| | 习题 | 360 |
| | 附录 12-A 第 12 章 MATLAB 程序清单 | 361 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 第 13 章 波动目标检测 | 364 |
| 13.1 引言 | 364 |
| 13.2 脉冲积累 | 364 |
| 13.2.1 相干积累 | 365 |
| 13.2.2 非相干积累 | 366 |
| 13.2.3 改善因子和积累损耗 | 366 |
| 13.3 目标起伏: 目标 χ^2 族 | 367 |
| 13.4 平方律检波器的虚警概率公式 | 368 |
| 13.4.1 平方律检测 | 371 |
| 13.5 探测概率的计算 | 372 |
| 13.5.1 Swerling 0 (Swerling V) 目标的探测 | 372 |
| 13.5.2 Swerling I 目标的探测 | 374 |
| 13.5.3 Swerling II 目标的探测 | 375 |
| 13.5.4 Swerling III 目标的探测 | 376 |
| 13.5.5 Swerling IV 目标的探测 | 378 |
| 13.6 起伏损耗的计算 | 380 |
| 13.7 累积探测概率 | 381 |
| 13.8 恒虚警率 (CFAR) | 383 |
| 13.8.1 单元-平均 CFAR (单个脉冲) | 384 |
| 13.8.2 采用非相干积累的单元-平均 CFAR | 385 |
| 13.9 MN 检测 | 386 |
| 13.10 雷达方程回顾 | 387 |
| 习题 | 388 |
| 附录 13-A 不完全伽马函数 | 390 |
| 附录 13-B 第 13 章 MATLAB 程序清单 | 392 |

第五部分 关于雷达的一些特殊主题

| | |
|-----------------------|-----|
| 第 14 章 雷达截面积 (RCS) | 407 |
| 14.1 RCS 定义 | 407 |
| 14.2 RCS 和姿态角及频率的依赖关系 | 408 |
| 14.3 RCS 与极化的依赖关系 | 411 |
| 14.3.1 归一化电场 | 411 |
| 14.3.2 极化 | 411 |
| 14.3.3 目标散射矩阵 | 413 |
| 14.4 简单物体的 RCS | 415 |
| 14.4.1 球 | 415 |
| 14.4.2 椭球 | 417 |
| 14.4.3 圆形平板 | 419 |

| | | |
|---------------|----------------------------|------------|
| 14.4.4 | 截锥体 (平截面) | 420 |
| 14.4.5 | 圆柱体 | 423 |
| 14.4.6 | 矩形平板 | 425 |
| 14.4.7 | 三角形平板 | 428 |
| 14.5 | 复杂目标的 RCS | 429 |
| 14.6 | RCS 预测方法 | 430 |
| 14.6.1 | 计算电磁学 | 431 |
| 14.6.2 | 有限差分时间域方法 | 431 |
| 14.6.3 | 有限元方法 | 433 |
| 14.6.4 | 积分方程 | 434 |
| 14.6.5 | 几何光学 | 435 |
| 14.6.6 | 物理光学 | 435 |
| 14.6.7 | 边缘衍射 | 437 |
| 14.7 | 多次反射 | 437 |
| | 习题 | 438 |
| | 附录 14-A 第 14 章 MATLAB 程序清单 | 439 |
| 第 15 章 | 相控阵天线 | 456 |
| 15.1 | 方向性、功率增益和有效孔径 | 456 |
| 15.2 | 近场和远场 | 457 |
| 15.3 | 通用阵列 | 458 |
| 15.4 | 线性阵列天线 | 460 |
| 15.4.1 | 阵列锥削 | 463 |
| 15.4.2 | 通过 DFT 进行方向图计算 | 465 |
| 15.5 | 平面阵列 | 470 |
| 15.5.1 | 矩形网格阵列 | 471 |
| 15.5.2 | 圆形网格阵列 | 472 |
| 15.5.3 | 同轴网格圆形阵列 | 478 |
| 15.5.4 | 带圆形边界的矩形网格阵列 | 479 |
| 15.5.5 | 六边形网格阵列 | 479 |
| 15.6 | 阵列天线扫描损失 | 490 |
| 15.7 | 多输入多输出 (MIMO) —— 线性阵列 | 492 |
| | 习题 | 495 |
| | 附录 15-A 第 15 章 MATLAB 程序清单 | 496 |
| 第 16 章 | 自适应信号处理 | 509 |
| 16.1 | 非自适应波束形成 | 509 |
| 16.2 | 使用最小均方的自适应信号处理 | 512 |
| 16.3 | LMS 自适应阵列处理 | 515 |